

УДК 666.651.2:546.46

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЛИНИСТОГО СЫРЬЯ МЕСТОРОЖДЕНИЯ «КРУПЕЙСКИЙ САД» ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ТЕРМОСТОЙКИХ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ

Канд. техн. наук Р. Ю. ПОПОВ¹, И. Р. ГУЛА², канд. техн. наук Е. М. ДЯТЛОВА¹, канд. техн. наук А. Н. ШИМАНСКАЯ¹ (e-mail: shimanskaya@belstu.by), канд. техн. наук Е. О. БОГДАН¹, И. А. КУЛИШ¹

¹Учреждение образования «Белорусский государственный технологический университет» (Минск, Республика Беларусь)

²Производственное унитарное предприятие «Лоевский комбинат строительных материалов» ОАО «Полесье-строй» (Лоев, Республика Беларусь)

Проведено комплексное изучение минералогического и химического состава, а также технологических свойств глины месторождения «Крупейский сад» Республики Беларусь. Установлены особенности формирования структуры и фазового состава термостойких керамических материалов, полученных с использованием полиминерального глинистого сырья, во взаимосвязи с физико-химическими свойствами и эксплуатационными характеристиками

Ключевые слова: глина месторождения «Крупейский сад», термостойкое керамическое изделие, температурный коэффициент линейного расширения, кордиерит, индиалит, структура

THE PROSPECTS FOR THE USE OF CLAY RAW MATERIALS FROM THE "KRUPEISKY SAD" DEPOSIT FOR OBTAINING HEAT-RESISTANT CERAMIC PRODUCTS

R. Yu. Popov¹, I. R. Hula², E. M. Dyatlova¹, H. M. Shymanskaya¹, K. A. Bohdan¹, I. A. Kulish¹

¹Belarusian State Technological University (Minsk, the Republic of Belarus)

²Production Unitary Enterprise "Loyevsky Combine of Building Materials" JSC "Polesestroy" (Loev, the Republic of Belarus)

The complex study of the mineralogical and chemical composition, as well as the technological properties of clay from the "Krupeisky Sad" deposit of the Republic of Belarus, was carried out. The features of the formation of the structure and phase composition of heat-resistant ceramic materials obtained with the use of polymineral clay raw materials, in connection with the physicochemical properties and operational characteristics, were established

Keywords: clay of the "Krupeyskiy Sad" deposit, heat-resistant ceramic product, temperature coefficient of linear expansion, cordierite, indialyte, structure

Благодаря низким значениям температурного коэффициента линейного расширения, наряду с высокой химической стойкостью, удовлетворительной механической прочностью и хорошими электроизоляционными свойствами, кордиеритовая керамика широко применяется для изготовления носителей катализаторов, изоляторов, фильтров, дугогасительных камер в высоковольтных выключателях, термостойкой посуды, капсул, лещадок, подста-

вок, тиглей, конструктивных элементов промышленных печей периодического и непрерывного действия [1 – 5].

В настоящее время в Республике Беларусь кордиеритсодержащая термостойкая керамика различного назначения применяется на предприятиях машиностроительной и нефтехимической промышленности, а также при производстве керамических материалов. В связи с отсутствием произво-

дителей предприятия вынуждены импортировать кордиеритсодержащие изделия, а некоторые – производить термостойкую керамику для собственных нужд.

Одной из причин, по которой кордиеритсодержащие изделия промышленно не выпускаются в Республике Беларусь, является отсутствие разрабатываемых месторождений высококачественного огнеупорного глинистого сырья, которое традиционно используется для получения данного вида керамики [6]. Несмотря на значительные запасы каолина, перспективность которых для производства термостойкой керамики показана в работах [7 – 9], на территории Республики Беларусь в основном добываются легкоплавкие и тугоплавкие глины, что обуславливает необходимость изучения возможности применения местных глинистых пород.

Следует отметить, что в научно-технической литературе описан положительный опыт получения кордиеритовой керамики с необходимым комплексом физико-химических свойств на основе глинистого сырья различной огнеупорности, вплоть до легкоплавкого [10 – 12].

В связи со сказанным изучение свойств глины месторождения «Крупейский сад» и исследование возможности ее использования для получения новых видов керамических материалов, производство которых отсутствует на территории Республики Беларусь, является весьма актуальным вопросом, позволяющим решать проблему расширения сырьевой базы и ассортимента продукции отечественной керамической промышленности.

Глина месторождения «Крупейский сад» (Гомельская обл.) представляет собой полиминеральное глинистое сырье с достаточно сложным минеральным составом и широким диапазоном свойств. Глины указанного месторождения залегают в четыре слоя, которые отличаются химическим, минералогическим и гранулометрическим

составом. Это сказывается на механических, сушильных, термических свойствах глин, а также на физико-химических характеристиках изделий, получаемых на их основе.

Для дальнейших исследований были отобраны пробы глины месторождения «Крупейский сад» из каждого слоя. Химический состав различных слоев глинистого сырья месторождения «Крупейский сад» приведен в табл. 1.

Анализ химического состава исследуемого глинистого сырья свидетельствует о существенном отличии в содержании Al_2O_3 и Fe_2O_3 в различных слоях. Как видно из данных табл. 1, количество Al_2O_3 в пробе 1-го слоя глины минимально и составляет 8,46 %, в то время как в пробах 3-го и 4-го слоев массовое содержание указанного компонента выше в 1,7...1,8 раза и составляет 14,53...15,59 %. Пробы 3-го и 4-го слоев глины характеризуются повышенным содержанием железа, что в пересчете на Fe_2O_3 составляет 8,55 и 6,03 % соответственно. Следует отметить, что цвет глинистого сырья, отобранного из различных слоев, также отличается. Так, глина из 1-го слоя характеризуется рыжей окраской, из второго – серой окраской, из третьего – красно-серой, а из четвертого – рыже-серой.

Минеральный состав также отличается: в некоторых слоях глины, кроме гидрослюда и каолинита, присутствует монтмориллонит, в других – в значительном количестве кварцевая составляющая, кроме того, встречается известняк, доломит, мергель в качестве сопутствующих минералов. В глинистое сырье входит песчаная полиминеральная составляющая, слагаемая из преимущественно пылевидных тонкозернистых и мелкозернистых фракций кристаллического кварца, полевых шпатов и гранитов, кроме того, фрагментарно могут встречаться крупные вкрапления и образования карбонатов.

Таблица 1. Усредненный химический состав различных слоев глинистого сырья

Слой глины	Массовое содержание оксидов, %*								п.п.п., %
	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	TiO_2	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	
Проба 1-го слоя глины	8,46	83,15	2,58	0,84	0,24	0,42	0,08	0,85	3,38
Проба 2-го слоя глины	24,23	62,84	2,23	0,95	0,37	0,4	0,04	0,14	8,80
Проба 3-го слоя глины	14,53	65,09	8,55	1,2	0,59	0,49	0,04	0,14	9,37
Проба 4-го слоя глины	15,59	64,29	6,03	1,03	0,95	0,82	0,10	0,61	10,58

*Здесь и далее по тексту приведено массовое содержание, %.

Проведенные исследования позволили установить, что исследуемые пробы глины в зависимости от химико-минералогического состава различаются по огнеупорным свойствам. Так, пробы глины 1-го, 3-го и 4-го слоев относятся к легкоплавкому сырью (ГОСТ 9169–75). В то время как проба глины, отобранная из 2-го слоя, является тугоплавкой.

Следует также отметить, что в соответствии с ГОСТ 9169–75 глина 1-го слоя относится к кислым (массовое содержание Al_2O_3 менее 14 %), а глины остальных слоев – к полукислым (содержание Al_2O_3 – 14...28 %) образованиям с высоким содержанием свободного кремнезема (более 25 %). Исследованные слои глины относятся к группе дисперсных, реже высокодисперсных по содержанию частиц менее 0,001 мм; по пластичности – к группе умеренно пластичных материалов (число пластичности 10,3...11,5); по коэффициенту чувствительности к сушке – к группе среднечувствительных, чаще высокочувствительных к сушке. Природная влажность глинистого сырья составляет в среднем 16...22 %.

Определение цветовых характеристик исследуемого глинистого сырья, термообработанного в интервале температур 900...1100 °С, проводилось визуально по шкале 1000-цветного атласа ВНИИ им. Д. И. Менделеева. Образцы, полученные на основе 1-го слоя глины, характеризовались окраской от красно-оранжевых 4.0–12/2 до коричнево-оранжевых 4.0–2/8 цветов; на основе 2-го слоя глины – от белого до розово-бежевого 4.3–10/2 цветов; на основе 3-го слоя глины – красно-коричневой 4.0–6/10 окраской; на основе 4-го слоя глины – коричневой 17.0–2/2 окраской (рис. 1).

Процессы, протекающие в исследуемом глинистом сырье при нагревании, изучали методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) с помощью калориметра DSC 404 F3 Pegasus фирмы Netzsch (Германия).

Согласно кривым ДСК, приведенным на рис. 2, в интервале температур 84...280 °С наблюдаются эндотермические эффекты, обусловленные удалением физически связанной воды из исследуемых проб глины. Для проб 1-го и 2-го слоев глины характерны менее интенсивные эндотермические эффекты, чем для проб глины, отобранных из 3-го и 4-го слоев. Следует отметить, что удаление адсорбционно-связанной воды

из проб глины 2-го и 4-го слоев происходит в два этапа, а из проб 1-го и 3-го слоев – в три этапа. По-видимому, в последнем случае минеральный состав исследуемого глинистого сырья характеризуется присутствием монтмориллонита, у которого удаление влаги затруднено в связи со структурными особенностями.

В интервале температур 470...580 °С наблюдаются процессы дегидратации глинистого сырья, которые идентичны для исследуемых проб, за исключением пробы 4-го слоя. При температуре 530 °С дополнительно фиксируется довольно интенсивный эндотермический эффект, который может быть связан с присутствием монтмориллонита в сырье.

На кривых ДСК фиксируются тепловые эффекты с минимумами при 575...576 °С, связанные с процессом полиморфного перехода кремнезема, содержащегося в пробах глины, из α - в β -модификацию. При этом наиболее интенсивный тепловой эффект наблюдается при нагревании пробы 1-го слоя глины, что, по-видимому, связано с избыточным содержанием кремнезема в ее составе. Экзотермический эффект, наблюдаемый при нагревании глины выше 890 °С, обусловлен перестройкой структуры.

Анализ процессов, протекающих при нагреве исследуемого глинистого сырья, позволяет сделать выводы о том, что пробы глины 1-го и 2-го слоев будут менее подвержены растрескиванию при термическом воздействии в интервале температур 80...300 °С по сравнению с пробами глины 3-го и 4-го слоев, в которых указанные процессы протекают более выражено. Также в пробе 1-го слоя глины при термообработке будут наблюдаться наиболее интенсивные объемные изменения, связанные с полиморфизмом кварца.

Исследование химико-минералогического состава глины месторождения «Крупейский сад», ее сушильных, термических и других свойств, позволило сделать вывод о перспективности использования данного сырья для получения керамических термостойких материалов и изделий.



Рис. 1. Внешний вид образцов, полученных на основе 1-го (а), 2-го (б), 3-го (в) и 4-го (г) слоев глины месторождения «Крупейский сад» при температуре обжига 1000 °С

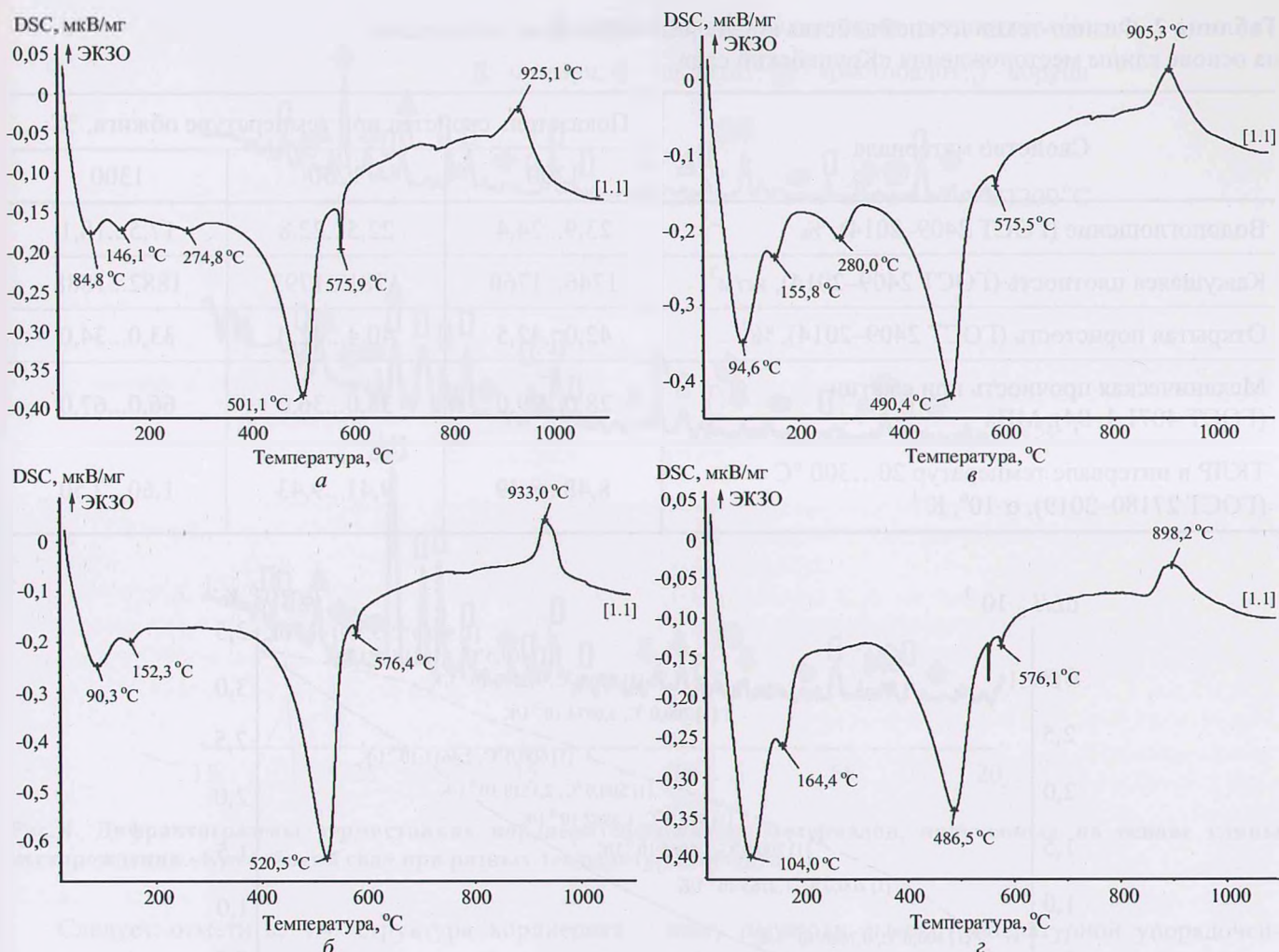


Рис. 2. Кривые ДСК первого 1-го (а), 2-го (б), 3-го (в) и 4-го (з) слоев глины месторождения «Крупейский сад»

В настоящей работе для получения термостойких кордиеритсодержащих керамических материалов применялась глина месторождения «Крупейский сад», отобранная из 2-го слоя и характеризующаяся максимальным содержанием Al_2O_3 – 24,23 %, а также тальк онотский (ГОСТ 19729–74) и технический глинозем марки ГК-1 (ГОСТ 30559–98) в соотношении, соответствующем теоретическому составу кордиерита [6, 13].

Предварительно измельченные до прохождения через сито № 1 сырьевые компоненты дозировали согласно рецептуре и смешивали в шаровой мельнице в течение 20 мин. Затем полученную массу увлажняли водой до 6...8 %, протирали через сито № 1, и она вылеживалась в течение 3 сут. После этого из керамической массы прессовали образцы в виде цилиндров диаметром 20...23 мм и палочек размером 5×5×50 мм при давлении 10...15 МПа, которые подсушивали в естественных условиях в течение 1 сут, после чего досушивали в электри-

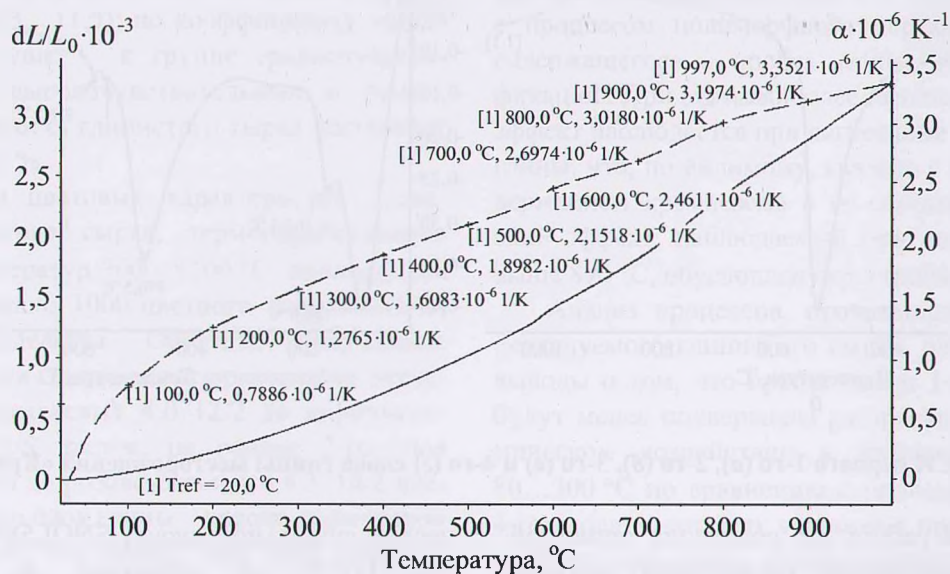
ческом сушильном шкафу SNOL58/350 (Литва) при 100...110 °C и обжигали в электрической лабораторной печи SNOL 1,6,2,5.1/13,5-Y1 (Литва) в интервале температур 1100...1300 °C с выдержкой при максимальной температуре 1 ч, скорость подъема температуры – 250 °C/ч.

В табл. 2 приведены результаты изучения физико-химических свойств образцов, синтезированных на основе указанных компонентов. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) полученных изделий определяли на электронном dilatометре DEL 402 PC (Netzsch, Германия), механическая прочность при сжатии – на универсальной электромеханической испытательной машине Galdabini Quasar 100 (Италия).

Как видно из представленных на рис. 3 данных, ТКЛР образцов, синтезированных при температуре 1300 °C, закономерно увеличивается от $0,79 \cdot 10^{-6}$ до $3,35 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ при их нагревании от 100 до 1000 °C.

Таблица 2. Физико-технические свойства кордиеритсодержащих материалов на основе глины месторождения «Крупейский сад»

Свойство материала	Показатель свойства при температуре обжига, °С:		
	1200	1250	1300
Водопоглощение (ГОСТ 2409–2014), %	23,9...24,4	22,5...22,8	17,5...18,1
Кажущаяся плотность (ГОСТ 2409–2014), кг/м ³	1746...1760	1781...1793	1882...1888
Открытая пористость (ГОСТ 2409–2014), %	42,0...42,5	40,4...42,0	33,0...34,0
Механическая прочность при сжатии (ГОСТ 4071.1–94), МПа	28,0...29,0	35,0...36,0	66,0...67,0
ТКЛР в интервале температур 20...300 °С (ГОСТ 27180–2019), $\alpha \cdot 10^6, \text{K}^{-1}$	8,48...8,49	9,41...9,43	1,60...2,50

**Рис. 3.** Зависимость относительного удлинения dL/L_0 и ТКЛР образца кордиеритсодержащей керамики, синтезированной при 1300 °С, от температуры

Для исследования фазового состава синтезированных материалов применяли рентгеновский дифрактометр D8 Advance Bruker (Германия), идентификацию кристаллических фаз осуществляли с использованием международной картотеки Joint Comitee on Powder Diffraction Standarts и программного обеспечения DIFFRAC PLUS Bruker.

С помощью рентгенофазового анализа установлено, что основными кристаллическими фазами в синтезированных материалах являются кордиерит, индиалит (высокотемпературная модификация кордиерита), присутствуют муллит и энстатит, в незначительных количествах идентифицируются кристобалит и корунд (рис. 4).

Наличие высокотемпературной гексагональной модификации кордиерита–индиалита обеспечивает высокую устойчивость материала к термическому удару, химической коррозии, а также воздействию электрического поля. Причинами формирования индиалита могут являться изоморфные замещения в структуре кордиерита, на что указывают авторы работ [10, 14 – 18]. Такие структурные изменения, как правило, вызывают отклонение параметров ячейки от стандартных значений и деформацию решетки вследствие различий в размерах ионов, что в свою очередь может вызывать изменение температурных пределов устойчивости (стабильности) некоторых полиморфных форм кристаллической фазы.

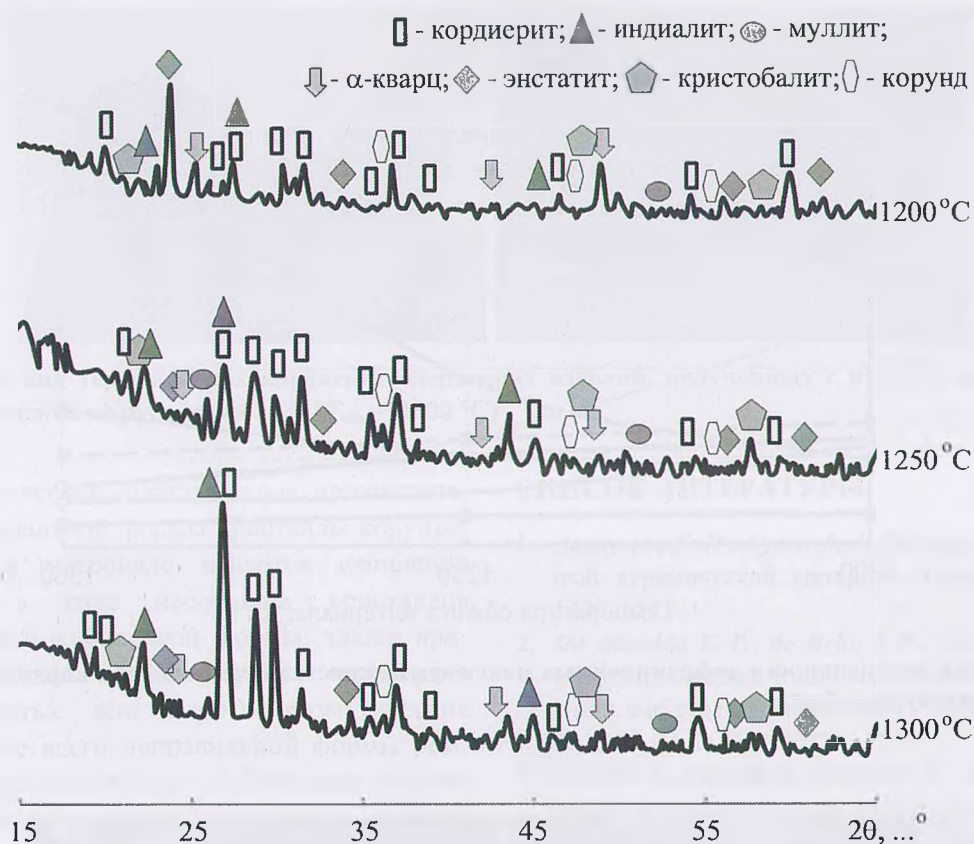


Рис. 4. Дифрактограммы термостойких кордиеритсодержащих материалов, полученных на основе глины месторождения «Крупейский сад» при разных температурах обжига

Следует отметить, что структура кордиерита и процессы, протекающие при его синтезе, способствуют осуществлению как изовалентных, так и гетеровалентных замещений, приводящих к образованию различных твердых растворов, изменяющих характеристики материала. Этим исследованиям посвящен целый ряд работ [10, 19 – 22]. Аналогичные явления также могут наблюдаться при использовании глинистого сырья сложного химического состава.

Присутствие железосодержащих компонентов в составе масс обеспечивает активное формирование индиалита и муллита за счет ускорения диффузионных процессов в результате образования легкоплавких эвтектик. В итоге при этом наблюдается активизация протекающих в материале твердофазовых реакций, что в конечном счете приводит к формированию как кордиерита, так и индиалита.

Известно [10, 14, 18], что ионы Fe^{2+} могут входить в кристаллическую структуру кордиерита. Именно это обстоятельство и связанная с ним легкая степень деформации кристаллической решетки кордиерита могут препятствовать обрат-

ному переходу высокотемпературной упорядоченной модификации кордиерита (индиалита) в низкотемпературную (кордиерит) в процессе охлаждения обожженных образцов.

Наличие кристобалита, муллита, энстатита, а также корунда в продуктах синтеза может говорить о незавершенности процессов фазообразования в материале, причем присутствие кристобалита связано, по нашему мнению, с избыточным содержанием аморфного кремнезема в глинистом сырье. Присутствие значительного количества кристобалита (до 1300 °C) существенным образом сказывается на ТКЛР керамики, несколько повышая данный показатель. Увеличение температуры обжига выше 1300 °C способствует процессу формирования кордиерита при уменьшении доли побочных фаз в составе материала (включая кристобалит), что в конечном счете приводит к значительному снижению значений ТКЛР и повышению термостойкости керамики [10]. В целом с увеличением температуры синтеза наблюдается постепенное уплотнение материала, в результате чего его механическая прочность повышается (рис. 5).



Рис. 5. Зависимость интенсивности дифракционных максимумов кристаллических фаз в кордиеритсодержащем материале от температуры обжига

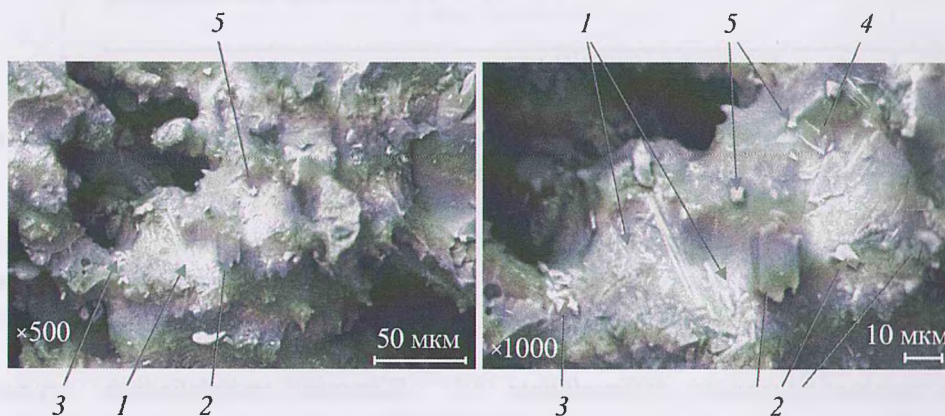


Рис. 6. Электронно-микроскопическое изображение поверхности скола образца, обожженного при температуре 1300 °C

1 – муллит; 2 – кордиерит; 3 – кристобалит; 4 – корунд; 5 – индиалит

Содержание побочных фаз в синтезированной керамике незначительно и составляет не более 20 %, что не оказывает принципиально негативного влияния на характеристики материала.

Микроструктуру полученных образцов исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа JEOL JSM-5610 LV с системой химического анализа EDXJED-2201 JEOL (Япония). Изображения получены с реальной поверхности скола образца при увеличении 500 – 1000 крат (рис. 6).

Изучение микроструктуры образцов, синтезированных при 1300 °C, позволило установить, что

их структура достаточно плотная, однородная, имеются поры неизометрической формы размером от 50 до 200 мкм. В структуре кордиеритсодержащего материала присутствуют как криптокристаллическая составляющая, соединяющая все исходные составляющие керамики, так и четко идентифицирующиеся кристаллические образования. Морфология кристаллов достаточно различима, и в соответствии с габитусными формами можно выделить: колоннообразные длинные тонкие частицы, а также игольчатые образования, характерные для кристаллической фазы муллита, располагающиеся близко к поверхности материала;



Рис. 7. Внешний вид термостойких кордиеритсодержащих изделий, полученных с использованием 2-го слоя глины месторождения «Крупейский сад» ($T_{\text{обж}} = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$)

длиннопризматические, пластинчатые призматические и пинокоидальной формы кристаллы корунда; кроме того, в материале имеются скопления кристобалита в виде небольших кристаллов октаэдрической и кубической формы; также присутствуют кристаллы основной фазы – кордиерита (короткостолбчатые или короткопризматические кристаллы, чаще всего неправильной формы ромбической (псевдогексагональной) сингонии, а также сложной формы кристаллы) и индиалита – гексагональных призм.

На основе разработанных керамических масс были изготовлены кордиеритсодержащие изделия – втулки для печей сопротивления (рис. 7).

Исследование термических свойств свидетельствует о том, что полученные изделия выдерживают термоциклирование (нагрев до $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ – охлаждение в воде) не менее 70 циклов. Рекомендуемая температура их эксплуатации составляет до $1250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Механическая прочность при сжатии термостойких изделий составляет не менее 50 МПа.

В настоящее время в условиях производственного унитарного предприятия «Лоевский комбинат строительных материалов» ОАО «Полесьестрой» проходит апробация разработанных составов в целях организации производства термостойких кордиеритсодержащих изделий на основе местного полиминерального глинистого сырья месторождения «Крупейский сад».

Таким образом, на основании результатов комплексного изучения глинистого сырья месторождения «Крупейский сад», а также исследований по разработке составов керамических масс показана принципиальная возможность применения данного сырья для получения термостойких кордиеритсодержащих материалов и изделий с требуемыми эксплуатационными характеристиками.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Авакумов Г. Н., Гусев А. А.* Кордиерит – перспективный керамический материал. Новосибирск: Наука, 1999. 167 с.
2. *De Almeida E. P., de Brito I. P., Ferreira H. C., et al.* Cordierite obtained from compositions containing kaolin waste, talc and magnesium oxide // *Ceramics International*. 2018. V. 44, Is. 2. P. 1719 – 1725.
3. *Lamara S., Redaoui D., Sahnoune F., et al.* Microstructure, thermal expansion, hardness and thermodynamic parameters of cordierite materials synthesized from Algerian natural clay minerals and magnesia // *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*. Apr. 2020. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0366317520300352> (дата обращения: 13.04.2021).
4. *Кривошапкина Е. Ф., Кривошапкин П. В., Дудкин Б. Н.* Микропористая керамика кордиеритового состава на основе природного сырья // *Известия Коми НЦ УрО РАН*. 2011. № 3(7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/mikroporistaya-keramika-kordieritovogo-sostava-na-osnove-prirodnogo-syrua> (дата обращения: 13.04.2021).
5. *Lei Z., Yang J., Hao Sh., et al.* Dan Application of surfactant-modified cordierite-based catalysts in denitration process // *Fuel*. 2020. V. 268. P. 117 – 242.
6. *Матренин С. В., Слосман А. И.* Техническая керамика. Томск: Изд-во ТПУ, 2004. 75 с.
7. *Попов Р. Ю., Лященко Е. А.* Использование каолинов Республики Беларусь для синтеза кордиеритсодержащей керамики // *Технологія-2013: матеріали міжнародної науково-технічної конференції*. Ч. I. Сєвєродонецьк, 2013. С. 178 – 181.
8. *Сергиевич О. А., Дятлова Е. М., Малиновский Г. Н. и др.* Особенности химико-минералогического состава и свойства каолинов белорусских месторождений // *Стекло и керамика*. 2012. № 3. С. 25 – 31. [*Sergievich O. A., Dyatlova E. M., Malinovskii G. N., et al.* Particulars of the chemical mineralogical composition and properties of kaolins from Belorussian deposits // *Glass Ceram*. 2012. V. 69, No. 3–4. P. 94 – 98.]

9. *Sergievich O. A., Dyatlova E. M., Popov R. Yu., Sobachevskii A. St.* Thermal and deformative characteristics of kaolin raw deposits of the republic of Belarus // Engineering structures and technologies. 2015. V. 7, No. 2. P. 93 – 98.
10. *Попов Р. Ю.* Термостойкие керамические кордиерит-содержащие материалы с пониженной температурой спекания: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.11: утв. 28.09.2011. Минск, 2011. 180 с.
11. *Хабас Т. А., Верещагин В. И., Вакалова Т. В. и др.* Низкотемпературный синтез кордиеритовой фазы в керамических массах из природного сырья // Огнеупоры и техническая керамика. 2002. № 10. С. 42 – 46.
12. *Пат. 2458886 РФ.* Шихта для получения кордиеритовой керамики / Г. А. Лебедева, Т. В. Попова, В. П. Ильина, В. В. Щипцов. № 2010150250/03; заявл. 07.12.2010; опубл. 20.08.2012. Бюл. № 23. 5 с.
13. *Бобкова Н. М.* Физическая химия тугоплавких неметаллических и силикатных материалов. Минск: Выш. шк., 2007. 301 с.
14. *Логвинков С. М., Семченко Г. Д., Кобызева Д. А.* Влияние периодических реакций в системе $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ на фазовый состав и свойства кордиеритсодержащих материалов // Огнеупоры. 2001. № 6. С. 16 – 22.
15. *Пат. 8183 РБ.* Состав шихты для изготовления кордиеритовой керамики / И. М. Терещенко, Р. Ю. Попов. № а20040151; заявл. 01.03.2004; опубл. 30.09.2005. Бюл. № 2. 5 с.
16. *Пат. 16163 РБ.* Состав шихты для получения кордиеритовой керамики / Е. М. Дятлова, К. Б. Подболотов, Е. С. Какошко, Л. Г. Шишканова. № а20110004; заявл. 03.01.2011; опубл. 03.08.2012. Бюл. № 5. 5 с.
17. *Пат. 2494995 РФ.* Шихта для получения кордиеритовой керамики / Н. В. Стуценко. № 2011103506/03; заявл. 02.02.2011; опубл. 10.10.2013. Бюл. № 28. 5 с.
18. *Терещенко И. М., Попов Р. Ю., Кравчук А. П., Ивашкевич Л. С.* Использование нетрадиционных сырьевых материалов для получения термостойкой керамики // Стекло и керамика. 2009. № 4. С. 14 – 16. [*Tereshchenko I. M., Popov R. Yu., Kravchuk A. P., Ivashkevich L. S.* Use of unconventional initial materials to obtain heat-proof ceramic // Glass Ceram. 2009. V. 66, No. 3–4. P. 129 – 131.]
19. *Салычиц О. И., Дятлова Е. М.* Влияние оксидов железа (II) и стронция на структуру и свойства магнийалюмосиликатной керамики // Весці Нац. акад. навук Беларусь. Сер. Хімічных навук. 2007. № 3. С. 104 – 107.
20. *Дятлова Е. М., Миненкова Г. Я., Колонтаева Т. В.* Интенсификация спекания муллит-кордиеритовой керамики с применением минерализаторов // Стекло и керамика. 2000. № 12. С. 21–23. [*Dyatlova E. M., Minenkova G. Ya., Kolontaeva T. V.* Intensification of Sintering of Mullite-Cordierite Ceramics Using Mineralizers // Glass Ceram. 2000. V. 57, No. 11–12. P. 427 – 430.]
21. *Shi Z. M., Liang K. M., Gu S. R.* Effects of CeO_2 on phase transformation towards cordierite in $MgO-Al_2O_3-SiO_2$ system // Journal of Tsinghua University. 2001. V. 41, Is. 10. P. 1 – 4.
22. *Гусев А. А., Аввакумов Е. Г., Винокурова О. Б., Салостий В. П.* Влияние добавок оксидов переходных металлов на прочность, фазовый состав и микроструктуру кордиеритовой керамики // Стекло и керамика. 2001. № 1. С. 23 – 25. [*Gusev A. A., Avvakumov E. G., Vinokurova O. B., Salostii V. P.* The Effect of Transition Metal Oxides on the Strength, Phase Composition, and Microstructure of Cordierite Ceramics // Glass Ceram. 2001. V. 58, No. 1–2. P. 24 – 26.]